

このファイルについて

本稿は『WEB2.0の未来 ザ・シェアリングエコノミー』（伊藤穰一+デジタルガレージグループ 編著、インプレスR&D発行）に掲載している記事の本文テキストをクリエイティブ・コモンズ・ライセンスで配布するものです。



この作品はクリエイティブ・コモンズ・ライセンスの下で公開しています

地球規模のリアルタイム通信へ向け “大気圏時代”に突入した 光と無線のネットワーク

村井 純

学校法人慶應義塾常任理事兼慶應義塾大学環境情報学部教授

日本、いや世界のインターネット界で先駆的な役割を果たしてきた慶應義塾大学の村井純教授が、Web2.0時代に求められるインフラについて語る。インターネットの持つ「自由」と「創造性」という2大理念を実現するインフラとは何か？ 地球の表層をつなぐインターネットから、大気圏レベルのネットワーク社会へ向かうために、今何が必要なのか？

ネットワークやインターネットの研究分野では、ときにまったく新しい使い方やテーマが生み出されることがある。かつてダイヤルアップの登場によりインターネットの世界が大きく変わったように、インターネット技術の方向性を変化させる「技術的なうねり」とでもいうべきものが、その時々には起きている。

本書で主要なテーマとして取り上げられているWeb2.0も、インターネットの技術から派生した「うねり」の一つと言っていいただろう。インターネット技術の本質的なアーキテクチャ（構造・設計思想）を理解した上で、その「うねり」を逃すことなく、いかに新しいインフラストラクチャー（社会的な基盤）を構築していくかが、今、問われている。

では、Web2.0時代に求められるインフラとは、一体どのようなものなのか？

私は研究者として、「何のためにインターネットを作るのか？」と聞かれることがよくあるが、答えを一言でいえば、フリーダム（自由）とクリエイティビ

ティ（創造性）のためである。インフラ技術の研究とは、いわば踏み台のようなものである。その踏み台があることで、私たちはさまざまなクリエイティビティを発揮し、より高い場所にある成果（アプリケーションやコンテンツ）を手にすることができるのだ。

またインターネットの基盤となるIPの技術は、インフラとアプリケーションを完全に切り離すことを可能にしており、そのことがインフラの健全な競争を促している。インフラの発達、アプリケーションの進化を促すという側面もある。

たとえば、出版などを通じてUNIXの普及にかかわってきたティム・オライリー*は、「ユーザー個人の力がアプリケーションの進化を生む、『Web2.0』的な環境を守るためには、インターネットそのものが自由であり、個人のクリエイティビティを発揮させる構造になっていなければならない」と語っている（もちろん、UNIXがビジネス化しているという

ティム・オライリー：ソフトウェア、ネットワーク関連の専門書を出版するオライリー社の設立者。Web2.0の概念を提唱したことで知られる。

批判もあるのだが)。

自由であることこそがインターネットの技術の柱である。インターネットを支えるインフラに制約を設ける必要は、断じてない。

光ファイバーとワイヤレス通信が もたらしたもの

インフラについて、ここ最近のトレンドを見ると、光ファイバーとワイヤレス通信(無線)の分野が劇的に変化していることが分かる。ちなみに私の家は10Gbpsのネットワークでインターネットに接続されているのだが、料金は通信事業者が提供する1.5Mbpsの接続サービスと比べ非常に安価である。通信事業者から一般回線を借りるのではなく、敷設されているが未使用になっていた、いわゆる「ダークファイバー*」を借りて接続しているからだ。

このようにダークファイバーを貸し出ししたり、光ファイバーのうち特定の波長だけをバラ売りしたりすることが、今や一般化しつつある。では一体なぜ、10Gbpsものネットワークが必要なのだろうか。

じつは、現在市販されているコンピュータがすでに1Gbpsで「会話する能力」を備えているからだ。我が家は4人家族だが、もし各人が持つコンピュータがフルスピードで会話すると、それだけで4Gbpsが必要になる。ディスクの共有などをすれば、10Gbpsでも足りない計算だ。遅くとも数年中には、10Gbpsネットワークの能力不足があちこちで問題となってくるだろう。つまり今後は、少なくとも10Gbpsクラスの通信速度を前提としてアプリケーション開発やビジネスを進める必要がある。

インフラを語る上では、光ファイバーとワイヤレス通信を利用したコミュニケーションメディアとして、電話とテレビ

を外すことはできない。今や、この二つのインフラはデジタル化されつつあるが、これは大きな変化である。

インターネットが電話のインフラを利用して1990年代では、必要ときにだけダイヤルアップでインターネットに接続するという方法が主流だった。これでは、インターネットが本来目指している「対称性のあるアーキテクチャ」が実現できない。ここでいう「対称性のあるアーキテクチャ」とは、「お互いが対等に情報共有できるという構造」といった意味合いだが、ダイヤルアップでの従量課金モデルは、情報が一方通行でしか流れない構造になっている。

1個のグローバルIPアドレスを複数のコンピュータで共有するNAT*にも、同様の問題がある。ところが常時接続の普及により、電話そのものをアプリケーションの一つとして取り込むことが可能となった。

NAT :Network Address Translatorの略で、主に家庭内LANなどプライベートアドレスで構成されたネットワークを、インターネットと接続するために利用される。

電波のことを知らずして インターネットを語れない時代

ワイヤレス通信により、電波の上をデジタル情報が通るようになったことは歓迎すべきことだが、その背景には、デジタルテクノロジーの大きな進歩がある。たとえば、ワイヤレス通信に利用しようと思っていた周波数が、すでに他の通信で利用されていた場合、コンピュータは別の周波数を素早く割り当てようになっている。これは、限られた周波数帯を「共有」できるようになったことを意味する。そこで重要になってきたのが、「電波をどのように使えばいいのか」という議論である。

電話会社が携帯電話とインターネットを結びつける中で、今や「アンワイアード」(下図参照)のネットワークが主流になりつつあるのだが、現状ではまだまだ議論の場(問題解決の場)が成熟し

ダークファイバー：使用中の回線「ライトファイバー」に対して、光が通っていない回線(未使用の回線)であることから、このように呼ばれる。都市部には多くのダークファイバーが存在しており、安価で他の事業者に貸し出されている。

PLC：「電力線搬送通信」の意味。電気配線に特定周波数の信号を流すことで、データ通信を行う技術のこと。電気コンセントをLANコネクタのように利用することが可能となる。

RFID：ID情報を埋め込んだ「タグ」と呼ばれるICチップを利用し、データをやり取りする技術のこと。SuicaなどもRFIDの技術が応用されている。

WiFi：IEEE802.11の規格に準拠した無線LAN技術。業界団体であるWi-Fi Allianceにより、ライセンスされている。

ているとはいえない。

たとえばPLC*（高速電力線通信）の例を考えてほしい。PLCは電力線をネットワーク化するという技術だが、電波のノイズを出すという弱点があるため、現状ではまったく普及が進んでいない。つまりPLCの普及を考えている側と、無線ネットワークの規格を管理している側で、お互いの意見を調整する作業が上手くされていないということでもある。

もう一つ例を挙げよう。950MHzの周波数は、長距離のRFID*（無線ICタグ）に利用される周波数だが、この両側の周波数帯は携帯電話が使用しており、まさにドル箱の周波数帯といえる。その中に、まったく新しいRFIDのための周波数をどのように割り当てるのかということが、最大の問題点となっていた。実際には、どのように議論を進めていくべきかさえははっきりしない状況だった。

無線LANの「WiFi*」で利用される2.4GHzの周波数帯も、いろいろな家電製品による干渉を受けるという問題がある。卑近な例でいうと、私の知人が、「毎朝8時30分から9時の間だけインターネットが接続できなくなる」と言ってきたことがあった。調べてみると、ワイヤレスLANが設置された壁の向こう側に電子レンジがあり、毎朝同じ時間に使われていた。電子レンジが電波を妨害していたのである。

このように、電波の上手な使用はインターネットの未来に非常に大きな影響を与える。「電波のリテラシー」ともいうべきものについての議論をさらに深めて、社会的なコンセンサスを形成していくことが必要だ。これこそが、安心できるインターネットである。電波の研究とインターネットの研究も今や不可分である。インターネットの研究者が電波のことを知らなければならないというのは、今や私の信念でもある。

地上だけのインターネットから、 大気圏規模のインターネットの時代へ

インターネットのワイヤレス化のうちひとつの側面は、放送サービスのデジタル化である。放送のデジタル化とは、大量のデジタル情報が大量の受信機に対してシャワーのように降り注いでくるといった状況だ。そのため、このアーキテクチャに沿ったデバイスを作り上げる必要がある。我々がIETFで標準化を行っているのは、マルチキャストのIPを衛星を使って放送に乗せ、インターネット通信に使うというシステムだ。

具体的には、テレビ放送の電波を利用して、イーサネットのように情報をやり取りするというシステムである（データ放送の中から自分宛てのデータだけを取り出し、送信ノードに返事をするというアーキテクチャ）。このシステムは、ヨーロッパではすでにビジネスになっており、我々のアジア全体のネットワークにもこの技術が使われている。

放送用電波メディアは、上手に言えば非常に大きな力を発揮する。そういう意味では、放送がデジタル化された意義はすこぶる大きいものがある。今後のテレビ放送がどうなるかはまだ予測しきれないところはある。しかし、テレビのアナログ放送で使ってきた周波数帯にデジタルラジオが進出しようとしているなど、さまざまな魅力的な可能性に満ちていることは間違いない。

ワイヤレスの可能性について、もう少しお話ししよう。

私が代表を務めるWIDEプロジェクト*で行っている実験に「インターネットライトハウス」と呼ばれるものがあるが、これは、WiFi対応端末がどこにあるかという情報と、GPSの情報を組み合わせでデータベース化し、共有するという実験である。今は学生が中心になって、名

WIDEプロジェクト：インターネットにおける実験や研究を目的として、1988年に慶應義塾大学や東京大学、東京工業大学などが中心になって設立されたプロジェクト。

古屋の都市部をGPSとコンピュータをつけた自転車に乗り、1日で何十kmも走り回るといったデータ構築を行っている。

WiFi端末のチップ自体の値段は安いものだ。その廉価なチップでも、電波から得たWiFiステーションの位置情報を照らし合わせることによって、50m程度の精度で位置がわかるのである。この価格でこのクオリティを実現できる位置情報サービスのインフラは、今のところ存在していない。

もちろん、位置情報はプライバシーにかかわる問題があるので、アメリカ政府の連邦通信委員会は、守秘義務を課すことができる電気通信事業者に管理させるという考え方を採っている。今のところ日本にはそのような動きはないが、その前にデータベースを作っておきたいという関係者はいる。

日本は今や、どこの地方へ行ってもWiFiのステーションが見つかるブロードバンド大国だ。プライバシーの問題さえ解決すれば、低コストな位置情報のインフラを構築できる環境はすでにある。信頼性や正確性を実現するために、WiFiのステーションから位置情報を発信する技術も研究されている。

PHSでも300m、携帯電話の周波数帯では2kmくらい電波が届いてしまうため、現在のところ、位置情報インフラとしての精度は比較的大きい。ただし、GPSのように衛星からの信号がなくても位置がわかるため、新しいビジネスが生まれる可能性がある。法的に規制される可能性もあるが、今後の動向が注目される。

ワイヤレス通信に関しては問題点もあるため、これまでのところインターネットへの接続を前提とした利用は、地上での利用にとどまってきた。しかし早晩、大気圏すべてをカバーするものとなるはずである。利用のされ方として、乗

り物との関係は注目したいところだ。たとえば、「セグウェイ」のような誰もが気軽に乗れるような個人的な移動体への搭載はもちろん、車椅子などへの搭載も考えられている。すでに高齢社会を迎えている日本にとって、ワイヤレス通信の有用性は、大いに検討していくべき課題である。

「地球規模」だからこそ見逃せない 「レスポンスタイム」の問題

インターネットは今や大気圏をも巻き込む「地球規模」のネットワークであるが、この地球規模という観点から、いま切実な問題が提起されている。

その本質的な問題に入る前に、私の体験談からお話する。

インターネットで何か社会的な問題が起きると、私のところに連絡が入ることが多い。かつて、夜中の3時頃に新聞記者から電話がかかってきて、「どうしてネズミ講のようなもののためにインターネットを作ったのか」と質問されたことがあった。

WIDEプロジェクトでは、「NSPIXP-2」と呼ばれる日本最初のIX（インターネット相互接続ポイント）を運用しているのだが、パケットの伝送経路を調べるトレースルート*を実行すると「wide.adj.jp」というドメイン名が見えてしまう。今どきICMP*のプロトコルで通信するルーターなどないため、結局私のところしか問い合わせる先がないということになってしまう。

そんな中で珍しい苦情の電話が掛かってきた。相手はいきなり怒鳴って、「俺がオンラインゲームで負けた原因は、お前のサーバーだ。データの遅延時間が200ms（ミリ秒）もかかるインターネットを作ったせいだ」という。

よくよく話を聞いてみると、ブラジル在住のオンラインゲーマーであった。し

トレースルート:UNIXで使用されるコマンドの1つ。ネットワークの伝送経路を調べ、どのルータを経由したのかチェックできる。

ICMP:インターネット制御プロトコルの略で、IP通信におけるパケット損失の報告など、エラーメッセージの通知に利用されるプロトコル。

RTT :ネットワークにおいて、データが送信元と送信先を往復するのにかかる時間のこと。通信が経由するネットワークや通信相手のレスポンスによっても異なるため、必ずしも一定ではない。

インターネット・ランドスピードレコード：インターネットにおける、データ転送速度記録のこと。記録認定にあたっては、さまざまなルールや条件が設定されている。

DWDM :光ファイバーの通信速度を飛躍的に向上させることから、家庭内に10Gbitクラスのインターネット回線を引き込む構想のキーフィーチャとして注目されている。

かも聞いてみれば、彼はブラジルと日本の間で50msのRTT* (サーバー間の往復時間)が必要だという。ブラジルと日本の往復には、光でさえ133msかかる。つまり、このゲームユーザーは、光より速くデータ通信したいというわけだ。もちろん、光の速度を超えることなどできないが、ゲームユーザーに50msの通信だと思わせる方法には何かあるはずだ。

なぜ、地球の裏側との通信速度の話をしたかという、今このことが、地球規模のネットワークを考える前に、避けて通れない問題になりつつあるからだ。

東京大学の平木敬教授らと、「ランドスピードレコード*」というコンテストに参加している。このコンテストは、光ファイバーを利用して3万km先にあるハードディスクにどれだけの速度で書き込めるかを競うものだ。従来は7Gbpsが限界だったが、すでに8.8 Gbpsを実現している。つまり10Gbpsのインターフェイスカードの、ほぼ限界まで来ているということだ。

3万kmというと地球1周分の4分の3に相当する距離だが、これだけ離れていても10Gbpsクラスの書き込みができるということである。そこでレイテンシー、つまり地球全体で考えたときのレスポンスタイムが問題となってくる。今やインターネットの世界では、光の速度を意識した、あるいは地球の大きさを意識した環境を考えるべき時代になっているのだ。

技術進歩で、ネットのキャパシティは十二分にある。問題はその使い方

今、光ファイバーが、DWDM*という技術で魔法のように多重化できることはご存知だろうか。簡単に説明すると、もともと光ファイバーでは黄色い波長の光だけを通信に使っていた。そこに緑や赤の波長の光を同時に流すことで、データ

量を飛躍的に増やす技術が開発された。それが、「高密度波長多重方式」ともいわれるDWDMという技術だ。

DWDMを使った実験では、1本の光ファイバーで従来の1000倍ものデータを流すことに成功している。つまり既存の光ファイバーが、1000倍の機能を持つようになったわけだ。そのため現在のネットワーク環境下では、いくら使っても問題ないどころか、現状ではどんなに頑張っても使い切れない状態となっている。極端な話、先ほど紹介した地球規模の通信状況がいたるところに存在しても、支障のないキャパシティが確保されはじめているわけだ。

問題はむしろ、キャパシティに対して洗練された使い道がないという点である。ここでもう一つの課題が浮かび上がってくる。つまり、光ファイバーを流れる複数の波長(ラムダ)を、どのように接合していけばよいか、インターネットでいうところのルーティングをどうすればよいのかということだ。現時点では、この光ファイバーによるエクステンジを世界中でオープンな規格にすることが検討されている。

日本では電柱まで光ファイバーが引かれているため、家まで光ファイバーを引くこと自体は難しいことではない。あとは、そこに接続する機械さえもっと安価になれば、ラムダの技術が一般家庭に入ってくる。そうなれば、誰もが好き放題、繋ぎ放題でインターネットを使えるようになる。

今後は光ファイバーで高速ネットワークの基盤ができるため、エンドユーザーも帯域を気にすることなく、新しい創造活動に入ることができるようになる。

また、社会全体のインターネットへの依存度がより増してくると、トラフィックの分析が重要となってくる。たとえば、インターネットにおける通信の90%はトランスポート層のプロトコル

TCP :インターネットで標準的に利用されるプロトコル。エラー訂正機能などを備えるため、信頼性は高いが速度はあまり速くない。

UDP :インターネットで標準的に利用されるプロトコル。エラー訂正機能などはないが、その分スピードが速く、ストリーミング配信などに適している。

P2P :サーバを利用せずに、1対1でデータをやり取りするネットワーク形態のこと。ここでは、WinMXやWinnyによる匿名ネットワークの通信を指す。

であるTCP*で、残りの10パーセントはトランスポート層で使われるもう一つのプロトコルUDP*などがコントロールするストリームだ。ところがある統計によると実際は、全体の80%のトラフィックはwinnyなどP2P*の通信（TCPを利用）が占めるものだ。

すると、実質的なトラフィック（現在のP2Pによる通信は大部分が「いつかなくなる可能性がある」トラフィックであると考え、除外して考えることも必要だ）におけるUDPの割合は、50%に迫ってきているともいえる。UDPはTCPと比較してネットワークの混雑を制御するしきりを持たないので、現状ではUDPの比率が高まるとネットワークの制御は難しくなる。50%というのは、現状のネットワークで対応したことのない比率だ。

したがって、このような状況を前提としたソリューションを考えておかないと、今後しっかりとしたインフラは構築できないことになる。

真のインタラクティブ通信のために 乗り越えるべき「200ミリ秒」の壁

ここで、インターネットの経路制御が、いかに重要であるかの一例を挙げておきたい。あの同時多発テロ「9・11」（2001年9月11日）が起こったとき、私はニューヨークのJFK空港にいた。朝8時にブラジルから到着して、10時に出発予定だったのだが、8時45分頃に最初のハイジャック機が世界貿易センタービルに激突した。そして私たちは、そのまま避難を余儀なくされた。

そのとき私がアメリカ政府から聞かれたのが、「飛行場を閉鎖したように、アメリカのインターネットを世界中のネットワークから切り離した状態にしても、他国のインターネットは動くだろうか？」という質問だった。

実際にアメリカ国内のインターネットを切り離した場合、いちばん困るのはアメリカ自身だが、アメリカにトラフィックを依存している日本への影響も避けられない。ロシアや中国といったアジアの生命線となるトラフィックにも影響が出る。そのためには、冗長経路が必要となる。

また、すでに述べたように世界中が密接に結びついているこのネット上のトラフィックを語るときに、「遅延の問題」を避けることはできない。地球上のどこでも光の速度で通信できるようになったことから、それは大きな課題を我々につきつけている。光は133ms、つまり0.133秒という文字通り瞬く間に地球を一周するが、これからは、200ms程度の遅延であらゆる場所と通信できるようになる。

ちなみに、電話での通話で発生するエコーを減衰させるエコーキャンセラーは、遅延が400msを超えると作動するのだが、VoIPで電話のアプリケーションを動作させるには、その水準をクリアする必要があるということだ。

2005年の愛知万博のときに、インターネット通信を経由して合奏するというプロジェクトがあったのだが、ここでも遅延のコントロールが課題となった。音楽家が、相手の遅延を予測しながら演奏できるように、すべての小節で一定の遅延が発生することを前提として厳密なコントロールをしたのだ。ことほどさように、地球全体のネットワークを考えると、は、「遅延の制御」はもはや解決すべき課題である。

遅延が200ms以内に納まれば、実質的にリアルタイムでの「対話」が可能になるため、地球上のあらゆる場所からインタラクティブに参加できるアプリケーションを作ることも可能である。逆に地球があと10倍大きかったら、VoIPすらできなかつたに違いない。神様は地球を作

ったとき、いつの日かインターネットが人類みんなを繋ぐのだらうと思って、この大きさにしたのかもしれない。

インフラ技術が進展すれば 新しい可能性が次々に芽生える

ここで、ネットワークインフラの最新技術に関連して、いくつかの先進的な研究の状況を紹介する。

まずは遠隔医療だが、ネットワークの遅延を200ms以内に抑えることで、手術の精度は向上する。ハイビジョンなどにより映像のクオリティが良くなったことで、がん細胞の映像による診断など正確さもアップする。

もうひとつは立体映像だ。現状の立体映像技術では、コンピュータディスプレイの前に液晶をもう1枚入れ、ブラインドのように右目と左目で見る画像をコントロールして立体感を出すという方法がある。ところがこの方法では、映像の焦点と目の角度がズレてしまうため（映像のピントは画面では合っているが、目の角度が立体像を追ってしまう）、目が疲れやすいという問題がある。最新のハイビジョン映像では、解像度が向上したことにより、映像の影や動きを頭の中で解釈して立体感が感じられるようになってきている。これからハイビジョン実験などを見る機会があれば、ぜひ最前列で体験してほしい。

一方、上の画像は、遠隔地同士をネットワークで接続し、ペンコンピュータを利用して契約書にサインした画面である。このような書類作成システムができれば便利だと思い、先に技術だけ作ってみたが、なかなか難しい問題もある。たとえば、サインした人間が本人であるという判断は、どのようにすればよいか。弁護士や法律家はこれをどのように判断し、書類が法的にどのような効力を持つのか。

ここで信頼の形成に意味を持ってくることが、画面の解像度やインタラクティブ性、レイテンシーといった要素なのだ。インターネットを利用して、離れた地域で共同作業を行うという概念は、Web2.0にもつながる。これら実験的な技術が普及していけば、異なる地域に分散した「知恵」（人的リソース）を連結することが可能になるため、いわば「自律分散システム」の新しいアプリケーションやビジネスモデルが登場してくる。

たとえばアジア地域では、衛星のトランスポンダー経由のIPマルチキャストを利用する方法で、ネットワークがほとんど接続されていない国（ミャンマーなどのインターネット禁止国を含む）のインフラ構築を行っている。津波で被害を受けたアチェ州のシアクアラ大学にも、このネットワークを利用して各地の授業映像を相互に配信しているのだが、これも自律分散システムの一例といえる。

「自由」と「クリエイティビティ」を 追求していくために

さて、ここまで技術、特に無線と光ファイバーについて話をしたが、インターネットの世界では、ユーザーが標準化に非常に大きな影響を与えている。もちろん、インターネットの成立にあたっては、さまざまなマーケット主導の「デファクトスタンダード」（事実上の標準規格）や、公的機関が主導する「デジュリスタンダード」（公的な規格）が混在してきたのだが、一貫してユーザー主導による開発が進められてきた歴史がある。

つまり、デジタル技術に関しては、ユーザーが受け入れるかどうかメトリック（測定単位）なのだ。少なくとも、国内の市場を守るため、それぞれの国で異なる規格の電気コンセントが採用されたような状況に陥ることはない。

そのため、回線の速さや太さだけでは

なく、実際にどれだけいい仕事ができただかによってインフラは評価されるべきだ。したがって、インターネットユーザーの責任も以前より重くなっているといえる。インフラに限らず、デジタル情報を使ってビジネスをしたり、新しい物を作り出している人が、意見を出さなければ状況は変わっていかないのだ。

インターネットは知性をグローバルに連結し、インタラクティブな関係を作っていくということで、デジタル情報を使うユーザーに大きな流れを生じさせた。ここまでグローバル、かつ共通の環境を持つということは歴史上、インターネットが初めてといえる。我々の未来は、それをインフラとして支えていく光ファイバーや無線といった技術に、大きく依存している。

冒頭に、インターネットの目的は「フリーダム」と「クリエイティビティ」だといったが、社会と人が「自由」に、かつ「新しい創造性」を生み出していけるよう、我々はインフラの未来に対し、力強い関心を持って作り上げていく責任がある。